

## Распределение энергии в спектрах звезд, находящихся на поздних стадиях эволюции

А. М. Татарников,<sup>1,2,\*</sup> С. Г. Желтоухов,<sup>1,2</sup> Е. Д. Малик<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>2</sup>Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга  
Россия, 119234, Москва, Университетский пр-т, д. 13

<sup>3</sup>Институт астрономии Российской академии наук. Россия, 119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 48  
(Поступила в редакцию 04.02.2024; после доработки 22.02.2024; подписана в печать 28.02.2024)

В работе представлен каталог, содержащий сведения о распределении энергии в спектрах 263 звезд в диапазоне длин волн 0.4–100 мкм, находящихся на поздних стадиях эволюции и наблюдавшихся космической обсерваторией ISO. Для каждого объекта каталога по сглаженным кривым распределения энергии получены оценки наблюдаемых болометрических потоков. Каталог доступен на сайте [https://infra.sai.msu.ru/sai\\_lss\\_sed](https://infra.sai.msu.ru/sai_lss_sed) как в виде таблицы, так и в машиночитаемом формате. Показано, что для указанной выборки объектов ISO SWS спектры в диапазоне 2.4–45 мкм лишь в 60% случаев соответствуют общей форме континуума и могут быть использованы без перекалибровки. Проведен отбор углеродных звезд, доступных инфракрасным наблюдениям из обсерваторий МГУ. Для части из них получены первые оценки блеска в полосах  $K$ ,  $L$  и  $M$  с новой ИК-камерой LMP 2.5-м телескопа КГО.

PACS: 97.10.Fy, 97.10.Ri УДК: 524.31

Ключевые слова: AGB и post-AGB звезды, пылевые оболочки, каталоги.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.79.2430801](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.79.2430801)

### ВВЕДЕНИЕ

Звезды, находящиеся на AGB и post-AGB стадиях, являются важными поставщиками вещества в межзвездную среду. Это поздние стадии эволюции, на которые попадают звезды начальных масс  $0.5 - 8 M_{\odot}$  [1, 2]. Темп потери вещества на этих стадиях может находиться в широком диапазоне от  $10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$  до  $10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$ , а в отдельных случаях до  $10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$ . Сброшенное вещество удаляется от звезды со скоростью  $\sim 10 - 15$  км/с, образуя протяженную газопылевую оболочку вокруг звезды. В зависимости от отношения содержания C/O в звездной атмосфере состав пылинок в оболочке будет различным. Так, при  $C/O > 1$  звезда становится т.н. углеродной звездой, в спектре которой присутствуют полосы поглощения молекул  $C_2$ , HCN,  $C_2H_2$  и др., а среди пыли будут преобладать углеродные пылинки и пылинки из карбида кремния, с характерной эмиссионной особенностью на длине волны 11.3 мкм [3].

Исследование околозвездных пылевых оболочек практически невозможно без данных инфракрасных наблюдений. Это связано с характерными температурами как звезд на AGB стадии ( $T_* \leq 3500$  К), так и пыли в оболочках ( $T_{dust} < 1500$  К — их максимумы излучения лежат в ИК-диапазоне). Чем шире спектральный диапазон, в котором получены данные, тем надежнее определяются параметры оболочки и центральной звезды, начиная от

химического состава пылинок, заканчивая их размерами, законом распределения вещества в оболочке и, наконец, массой и размером оболочки.

В середине–конце 90-х годов на околоземной орбите работала инфракрасная космическая обсерватория ISO [4]. На ней было установлено несколько приборов, в частности спектрограф Short Wavelength Spectrometer (SWS, [5]), работавший в широком спектральном диапазоне от 2.36 до 45 мкм. Одним из основных классов объектов, наблюдавшихся с этим прибором, были AGB-звезды разных типов и post-AGB-звезды. Среди почти 900 объектов, наблюдавшихся с SWS, 263 принадлежат к этим типам звезд.

Только спектров ISO недостаточно для построения информативного распределения энергии в спектре (SED) звезды с пылевой оболочкой — наблюдения на более коротких длинах волн несут информацию о звездном компоненте, а на более длинных — о внешних, холодных областях оболочки, где может быть сосредоточена ее основная масса. Целью нашей работы является создание каталога SED в максимально широком спектральном диапазоне для звезд, находящихся на поздних стадиях эволюции и наблюдавшихся в ходе миссии ISO, и последующий отбор объектов для программы исследования околозвездных пылевых оболочек углеродных звезд.

### 1. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения в полосах  $K$ ,  $L$  и  $M$  проводились с камерой среднего ИК-диапазона LMP ([6, 7]),

\* E-mail:

установленной на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ (КГО, [8]). В качестве звезд сравнения использовались звезды из таблицы 6 работы [9], находившиеся на близкой воздушной массе к каждому из наблюдавшихся объектов. Модуляция светового потока проводилась перемещением телескопа каждые 5 с на угол  $10''$ . Измерения блеска проводились по схеме «объект1–стандарт1–объект2–стандарт2– и т. д.». Время между наблюдениями объекта и соответствующего стандарта не превышало 7 мин. Результаты наблюдений представлены ниже в табл. 2.

## 2. ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве источника данных о потоках в спектрах, полученных ISO, мы использовали атлас «An atlas of fully processed spectra from the SWS»<sup>1</sup> (далее Атлас). Методы обработки и нормировки спектров, использованные при составлении этого атласа, описаны в работе [10]. Для каждой записи в Атласе приведены имя объекта, уникальный номер наблюдения ISO (TDT — target dedicated time), экваториальные координаты, примечания и таблицы с распределением энергии. В Атласе представлено 1248 записей со спектрами примерно 900 объектов, полученными в режиме съемки AOT1, который подразумевает наблюдения в диапазоне длин волн от 2.36 до 45 мкм, а так же 23 спектра, полученных в режиме AOT6 с большим разрешением и более высокой чувствительностью.

На первом этапе из списка объектов Атласа мы отобрали звезды, находящиеся на поздних стадиях эволюции. Для этого координаты объекта отправлялись запросом в Simbad Astronomical Database–CDS (Strasbourg)<sup>2</sup>, и в качестве ответа принимался список типов, которыми помечен объект в этой базе данных. Всего было отобрано 263 объекта с типами AGB, Post-AGB, PPN и PN, Long Period Variable (LPV), Mira, Carbon star и Red Supergiant.

При исследовании объектов с околозвездными пылевыми оболочками важно анализировать распределение энергии в максимально широком спектральном диапазоне, который должен включать в себя как максимум излучения центрального источника, так и длинноволновое излучение пылевой оболочки. Это облегчает моделирование SED и позволяет получить надежную оценку болометрического потока (а при известном расстоянии и в предположении сферической симметрии оболочки или при наблюдении дискообразной оболочки «плашмя» — светимости центральной звезды). Длинноволновая граница этого диапазона обычно определяется наличием измерений объекта в каталогах

с обзорами всего неба в ИК-диапазоне (например, IRAS) и должна достигать как минимум 100 мкм. Коротковолновая граница определяется положением максимума излучения центральной звезды. В большинстве случаев для объектов, находящихся на поздних стадиях звездной эволюции, источником энергии выступает холодная звезда с  $T_{\text{эфф}} < 4000$  К (исключением являются прото-планетарные туманности и относительно горячие post-AGB объекты). В этом случае **при достаточно плотной пылевой оболочке** со стороны коротких волн достаточно иметь оценки блеска в полосах  $R, I$  или  $r, i, z$ . Для мирид и других холодных объектов с такой оболочкой и большой переменностью в видимом диапазоне длин волн (несколько звездных величин в полосе  $V$ ) достаточно иметь данные, начиная с полосы  $J$  обзора 2MASS. Это облегчает объединение данных, полученных на разных фазах переменности, т.к. у подобных объектов амплитуда в ближнем ИК-диапазоне  $\approx 1^m$  [11, 12]. Отметим, что при расчетах переноса излучения и температурного баланса в оболочке коротковолновая граница диапазона должна быть меньше имеющихся в SED данных. В противном случае возможна недооценка величины поглощаемого оболочкой излучения. Например, для звезды спектрального класса M0III неучет излучения на  $0.3 < \lambda < 0.7$  мкм приведет к потере 15% энергии, а для M5III — 3%.

Информацию о данных фотометрии и спектры ISO SWS мы собирали с помощью кода sedbys [13], созданного для компиляции SED молодых звезд. Он использует как общие каталоги 2MASS [14], AKARI [15], GALEX [16], Gaia [17], Tycho-2 [18], IRAS [19], JCMT [20], APASS [21], MSX6C [22], SDSS [23], SPITZER [24], WISE [25], XMMOM [26], так и каталоги наблюдений молодых объектов. Мы исключили обращение к последним, дополнив код обращением к каталогу спектров ISO LWS (данные с длинноволнового спектрографа обсерватории, работавшего в диапазоне 43–197 мкм) и приведением данных к единым единицам измерения. Собранные таким образом данные о наблюдениях являются основной каталогом SED звезд, находящихся на поздних стадиях эволюции.

## 3. ВЫЧИСЛЕНИЕ БОЛОМЕТРИЧЕСКИХ ПОТОКОВ

Сопоставление спектральных данных ISO SWS из Атласа и SED, построенных на основе фотометрических данных, показывает, что в целом ряде случаев они не совпадают. Пример характерного SED такого объекта показан на рис. 1. Видно, что в длинноволновом диапазоне спектр ISO соответствует фотометрическому SED, а в коротковолновой области (2.4–~7 мкм) потоки в спектре больше в несколько раз. Такие большие отличия нельзя объяснить переменностью этого объекта [27], и, соответственно, они должны быть связаны с неудачной калибровкой спектра в Атласе. На это указывает и лучшее совпадение спектра ISO, который

<sup>1</sup> <https://users.physics.unc.edu/~gcsloan/library/swsatlas/atlas.html>

<sup>2</sup> <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

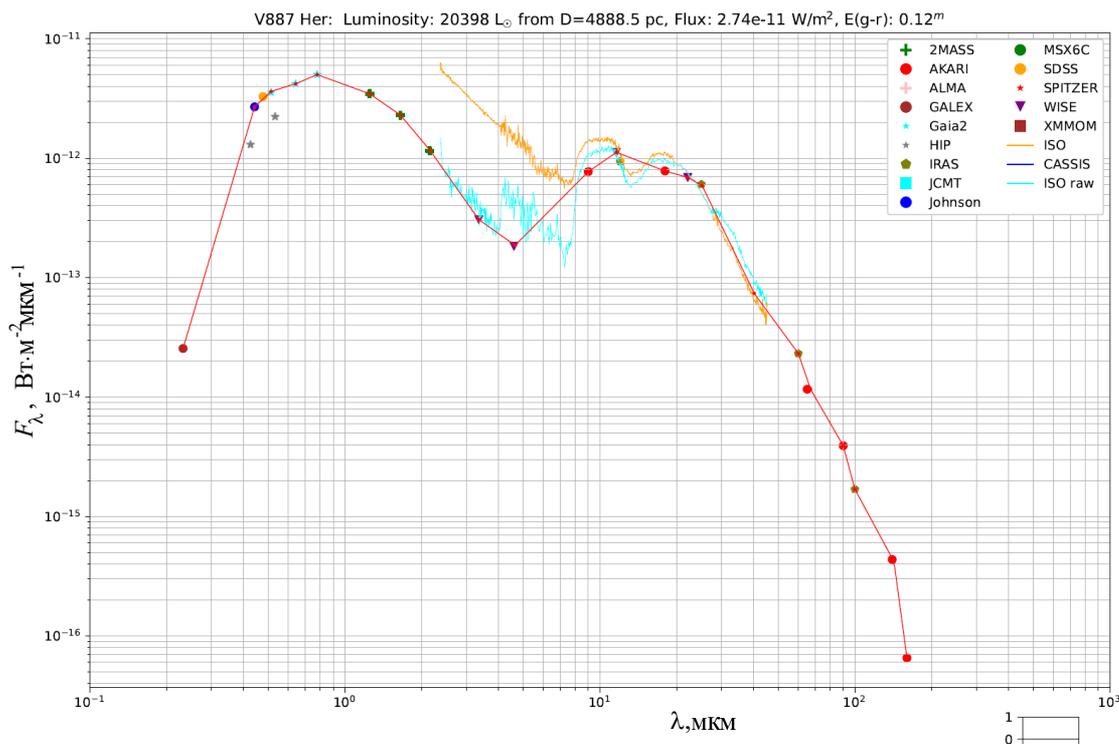


Рис. 1. Пример неполного совпадения распределения энергии в спектре известной post-AGB звезды V887 Her по результатам фотометрических наблюдений (символы разных цветов) и спектра ISO SWS из Атласа (оранжевая линия). Красной линией показан сглаженный SED, по которому вычислялся болометрический поток

скачан напрямую с сайта ISO (голубая линия на рис. 1) и сглажен медианным фильтром для снижения уровня шумов.

Мы обнаружили, что лишь менее 60% спектров ISO из Атласа можно использовать во всем диапазоне без перекалибровки. Еще 20% требуют относительно небольших изменений и могут применяться в работе, а оставшиеся спектры нельзя использовать при исследовании SED объектов без новой обработки исходных данных.

На рис. 2 приведен пример хорошего соответствия спектров ISO SWS, полученных на двух фазах пульсаций углеродной звезды S Cer, и фотометрического SED. Обращает на себя внимание значительное отклонение потоков в коротковолновых полосах W1 ( $\lambda = 3.35$  мкм) и W2 ( $\lambda = 4.6$  мкм) обзора WISE от общего хода SED. По всей видимости, это связано с пересветом детектора излучением столь яркого объекта, как S Cer ( $K \approx 0^m$ ,  $L \approx M \approx -1^m$ ). Среди объектов, наблюдавшихся ISO, много ярких звезд, и такое поведение оценок потоков WISE (при величинах потоков  $> 5 \times 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> мкм) надо принимать во внимание при анализе SED.

Еще один фактор, затрудняющий автоматическую компиляцию SED и вычисление по нему болометрического потока — это упомянутая выше переменность блеска, свойственная большинству звезд, находящихся на поздних стадиях эволюции. В видимом диапазоне она может приводить к измене-

нию потока на 1–2 порядка: в ближнем ИК — в  $\sim 2$  раза, в среднем и дальнем ИК — до 20–30% (см. рис. 2). При этом из-за того, что максимум излучения большинства объектов нашей выборки приходится на ближний ИК-диапазон, переменность в ближнем ИК примерно соответствует переменности болометрического потока, а переменность в видимом спектре меняет болометрический поток лишь на несколько процентов.

Из-за описанных факторов финальный SED, по которому вычислялся болометрический поток, проводился по собранным точкам вручную. Для помощи в этом была написана программа, которая разбивала весь спектральный диапазон на 20 поддиапазонов, равномерно расположенных в логарифмической шкале длин волн, и в каждом диапазоне выбирала фотометрические наблюдения с наибольшим потоком (спектральные данные программой не анализировались). Полученный программой SED демонстрировался пользователю, который с помощью компьютерной мышки удалял или переставлял предложенные программой точки, а также добавлял новые там, где это было необходимо, в том числе ориентируясь на спектры ISO и CASSIS.

Для вычисления наблюдаемого болометрического потока выполнялась линейная интерполяция между расставленными вручную (с помощью программы) точками SED в логарифмической шкале длин волн (пример такой интерполяции показан красной линией на рис. 1 и 2). *Получить оцен-*

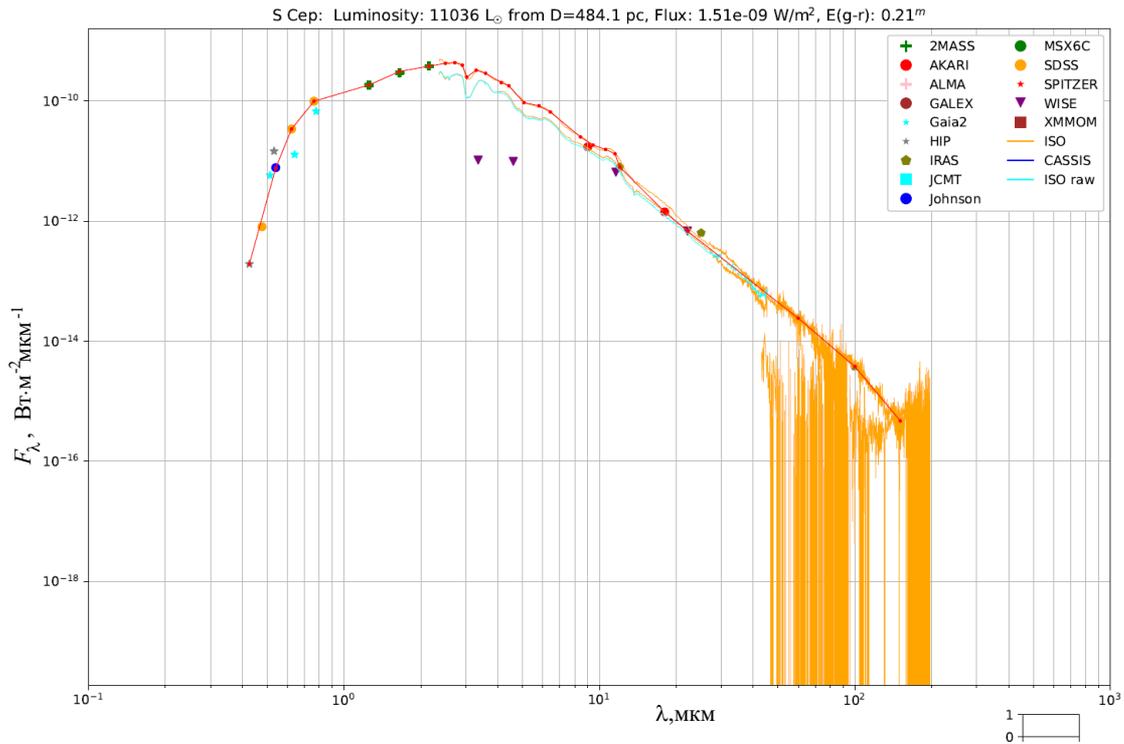


Рис. 2. Пример хорошего совпадения распределения энергии в спектре яркой углеродной звезды S Cep со спектром ISO SWS. Обозначения те же, что на рис. 1

ку точности определения болометрического потока достаточно непросту ввиду некоторой субъективности в проведении уровня континуума при построении SED. Сравнение результатов, полученных для хорошо изученных звезд, например, *V CrB* [11] и *T Dra* [12], показывает, что в случае достаточно подробно прописанных SED и при хорошем совпадении спектра ISO с фотометрическими данными ошибки определения болометрического потока, вероятно, не превышают 20%. Точность для звезд, SED которых хуже описывается имеющимися наблюдательными данными (как пример — *V4334 Sgr* или *LP And*) ожидаемо будет ниже.

Для вычисления светимости мы использовали расстояние, возвращаемое по запросу из SIMBAD Astronomical Database, и учитывали межзвездное поглощение в соответствии с картой поглощения [29] и законом межзвездного покраснения [30]. В большинстве случаев в качестве расстояния SIMBAD выдавала данные из Gaia EDR3 [28]. В случае отсутствия данных о расстоянии светимость вычислялась для расстояния 1 кпк в отсутствии межзвездного поглощения.

#### 4. ОПИСАНИЕ КАТАЛОГА SED ЗВЕЗД, НАХОДЯЩИХСЯ НА ПОЗДНИХ СТАДИЯХ ЭВОЛЮЦИИ

Собранный нами каталог SED звезд, наблюдавшихся обсерваторией ISO и находящихся на поздних стадиях эволюции, размещен на сайте группы

ИК-астрономии ГАИШ МГУ: [https://infra.sai.msu.ru/sai\\_lss\\_sed](https://infra.sai.msu.ru/sai_lss_sed). Он содержит 263 объекта: 63 мириды и AGB-звезды, 56 углеродных звезд, 48 post-AGB звезд и 96 объектов других типов (S звезды, протопланетарные туманности, долгопериодические переменные, красные сверхгиганты и др.). Отметим, что при подсчете звезд разных типов и при указании типа в каталоге использовалась классификация SIMBAD. При этом, например, Общий каталог переменных звезд [31] часть углеродных звезд относит к миридам, а часть AGB-звезд — к полуправильным переменным.

Каждому объекту в каталоге соответствует запись, содержащая 15 полей. Это стандартные поля с именем звезды, координатами и блеском и поля с компилированным и интерполированным SED (в виде текстовых таблиц, рисунков и машиночитаемых данных), а также архивом со всеми данными и спектрами ISO. Подробнее описание записей каталога приведено в табл. 1.

В поле SED pic, помимо ссылки на график с компилированными точками SED, спектром ISO и интерполированным SED, содержится указание на степень соответствия спектра ISO SWS из Атласа общему ходу SED, построенному по фотометрическим данным. Символ «+» рядом со ссылкой означает хорошее совпадение ISO спектра с данными фотометрии. Такие спектры можно автоматически объединять с фотометрическими данными в общий SED в широком спектральном диапазоне и использовать, например, при моделировании околозвезд-

Таблица 1. Описание полей каталога SED

№	Поле	Описание	Примечание
1	Object	Имя объекта	В читаемом SIMBAD виде
2	Type	Тип объекта	Тип объекта и спектральный класс при наличии
3	R.A.	Прямое восхождение, HH:MM:SS.ss	На равноденствие J2000
4	Dec	Склонение, DD:MM:SS.ss	На равноденствие J2000
5	J mag	Блеск в полосе J	По данным обзора 2MASS
6	Flux	Наблюдаемый болометрический поток, Вт/м <sup>2</sup>	Интеграл под интерполированным SED
7	Luminosity	Светимость объекта	На расстоянии Distance с учетом межзвездного поглощения
8	Distance	Расстояние в парсеках	При отсутствии данных о расстоянии ставится <i>nan</i> , а светимость считается для 1000 пк и $E(g-r) = 0$
9	$E(g-r)$	Избыток цвета	<i>nan</i> , если величина неизвестна
10	Phot Pic	График SED по данным наблюдений	PNG файл
11	SED Pic	График SED с интерполяцией данных	PNG файл. Символ «+» означает совпадение ISO SWS спектра с данными фотометрии; символ «-» означает значительное расхождение спектральных и фотометрических данных; символы «+-» означают хорошее совпадение спектральных и фотометрических данных на значительном интервале длин волн
12	Phot dat	SED по данным наблюдений	Текстовая таблица
13	SED dat	Интерполированный SED	Текстовая таблица
14	JSON dat	Все данные в формате JSON	JSON объект
15	Archive	Все данные и спектры ISO	ZIP архив

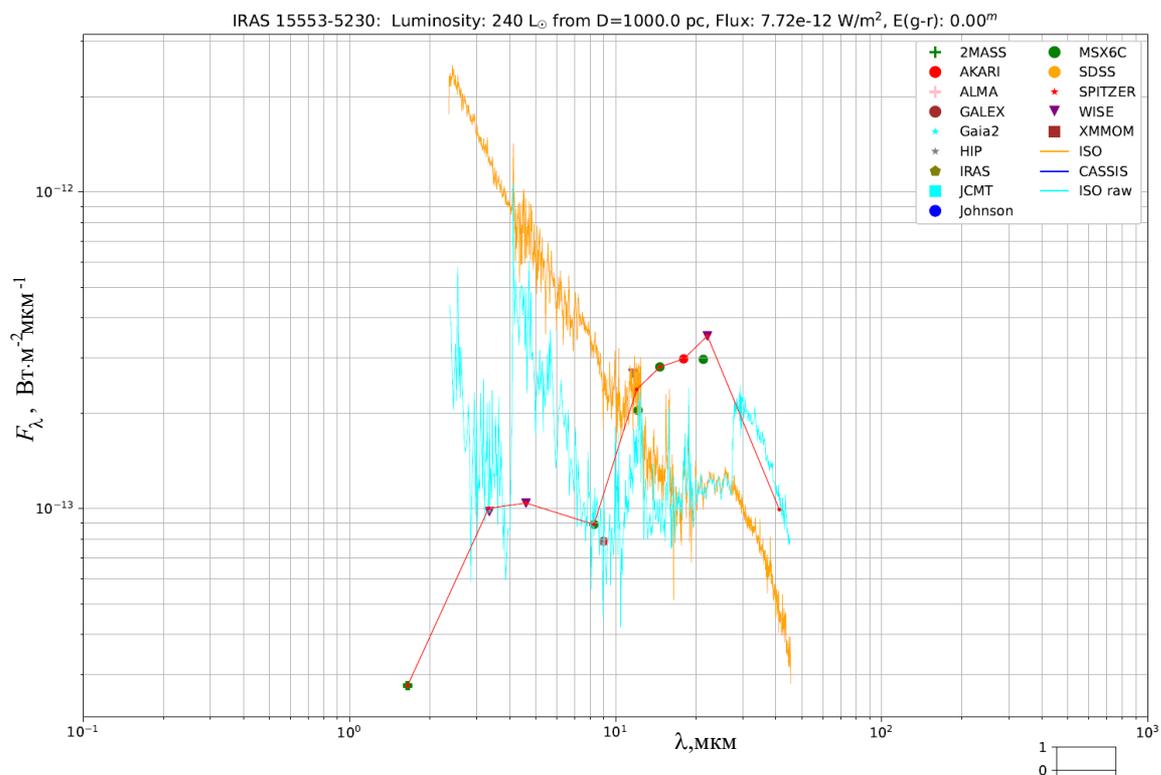


Рис. 3. Распределение энергии в спектре post-AGB объекта IRAS 15553-5230. Обозначения те же, что на рис. 1

ных пылевых оболочек. Символы «+» рядом со ссылкой на график означают, что спектр ISO частично соответствует SED и в этой части может быть использован без перекалибровки. Если рядом со ссылкой на график SED Pic стоит знак «-», то

для этого объекта использование спектров ISO без перекалибровки практически невозможно. Пример такого случая показан на рис. 3. На нем хорошо видно, что форма ISO спектра post-AGB звезды IRAS 15553-5230 отличается от фотометрических оценок

Таблица 2. Результаты ИК фотометрии избранных объектов каталога

Объект	Дата	$K$	$L$	$M$
CW Leo	2024-01-29	$-0.22_{\pm 0.03}$	$-3.75_{\pm 0.01}$	$-4.83_{\pm 0.05}$
HV Cas	2024-01-30	$2.21_{\pm 0.05}$	$0.69_{\pm 0.05}$	$0.66_{\pm 0.05}$
RU Vir	2024-01-25	$1.73_{\pm 0.02}$		$-0.12_{\pm 0.05}$
RW LMi	2024-01-29	$0.61_{\pm 0.02}$	$-2.21_{\pm 0.02}$	$-2.86_{\pm 0.07}$
RX Boo	2024-01-28	$-1.88_{\pm 0.02}$	$-2.42_{\pm 0.05}$	$-2.15_{\pm 0.05}$
RY Dra	2024-01-30	$0.16_{\pm 0.02}$	$-0.62_{\pm 0.02}$	$0.12_{\pm 0.02}$
S Cep	2024-01-25	$-0.15_{\pm 0.05}$		$-1.39_{\pm 0.02}$
T Lyn	2024-01-30	$2.88_{\pm 0.05}$	$1.92_{\pm 0.03}$	$1.80_{\pm 0.03}$
U Cam	2024-01-30	$0.37_{\pm 0.05}$	$-0.36_{\pm 0.05}$	$0.41_{\pm 0.10}$
V623 Cas	2024-01-30	$1.15_{\pm 0.05}$	$0.46_{\pm 0.02}$	$0.94_{\pm 0.11}$
W Ori	2024-01-30	$-0.44_{\pm 0.03}$	$-1.07_{\pm 0.03}$	$-0.74_{\pm 0.04}$

потока во всем диапазоне длин волн — фотометрический SED имеет двухгорбую форму и принадлежит холодному объекту с  $T_{\text{eff}} \sim 1000$  К с пылевой оболочкой, а на ISO спектре из Атласа мы видим степенное падение потока, характерное для области Рэлея–Джинса объекта с температурой  $>3000$  К.

### УГЛЕРОДНЫЕ ЗВЕЗДЫ С ПЫЛЕВЫМИ ОБОЛОЧКАМИ

Используя собранный каталог, мы сделали выборку углеродных звезд для будущего исследования их околозвездных пылевых оболочек, как это было сделано нами для V CrB в [11] и для T Dra в [12]. Кроме типа звезды, основными критериями отбора выступали 1) совпадение формы фотометрического SED и спектра ISO (т.е. наличие знака «+» в столбце Sed Pic) и 2) кульминация на воздушной массе  $M_z < 2$  в КГО и Крымской астрономической станции ГАИШ. Для повышения точности определения светимости дополнительным критерием отбора мы выбрали ограничение на расстояние —  $D < 1500$  пк. Указанным критериям удовлетворяют 27 объектов каталога: AFGL 2699, HV Cas, IRC +00365, IRC +10216, IRC -10095, PQ Cep, RU Vir, RY Dra, S Cep, S Sct, SS Vir, T Dra, TT Cyg, TU Tau, TX Psc, U Cam, V Aql, V CrB, V Cyg, V460 Cyg, V623 Cas, V636 Mon, V833 Her, VX And, W Cas, W Ori и Y CVn.

Первые результаты фотометрических наблюдений выборки углеродных звезд с ИК-камерой LMP представлены в табл. 2. Контроль точности фотометрии выполнялся по измерениям нескольких стандартов, расположенных на близких воздушных массах. Видно, что в среднем ИК-диапазоне все эти звезды представляют собой яркие источники, точность фотометрии которых определяется не шумами (фотонными или инструментальными), а фотометрической привязкой к стандартам, расположенным в других частях небесной сферы. Показатели цвета  $K - L$  всех объектов значительно боль-

ше показателей цвета нормальных звезд (см., например, [32]), что указывает на наличие избытка ИК-излучения, связанного с околозвездными пылевыми оболочками.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При моделировании SED-объектов, окруженных пылевыми оболочками, важно иметь данные в максимально широком спектральном диапазоне — от ультрафиолета (особенно в случае горячих post-AGB или PPN-объектов) до дальнего ИК-диапазона. Для аргументированного подбора химического состава пылинок важную роль играют спектры, полученные в ИК-диапазоне, прежде всего в области 8–25 мкм, на которую приходятся эмиссионные особенности силикатных пылинок, пылинок из карбида кремния и др. Ближний ИК-диапазон важен при выборе параметров звезды, находящейся внутри оболочки, особенно в случае холодных звезд. Например, сравнение спектров углеродных звезд, полученных в области 2 — 5 мкм, с моделями атмосфер из [33], позволило в работах [11, 12] получить  $T_{\text{eff}}$  звезды внутри плотной пылевой оболочки и использовать при моделировании реалистичное приближение спектра звезды вместо обычно используемого излучения абсолютно черного тела.

Спектры в широком диапазоне от 2.36 до 45 мкм для большого числа AGB и post-AGB объектов были получены космической обсерваторией ISO. На базе этих спектров, представленных в атласе «An atlas of fully processed spectra from the SWS» и описанных в работе [10], нами был собран каталог SEDs of the Late Stages Stars (доступен по адресу [https://infra.sai.msu.ru/sai\\_iss\\_sed](https://infra.sai.msu.ru/sai_iss_sed)). В нем для 263 объектов представлены SED в диапазоне 0.4 —  $>100$  мкм, вычислены болометрические потоки и приведены сглаженные SED (без учета и с учетом межзвездного поглощения). Данные из каталога можно напрямую использовать

при моделировании околозвездных пылевых оболочек (как, например, это было сделано в статье [12]: использовался SED углеродной звезды T Dra из нашего каталога и дополнительные данные ИК спектральных и фотометрических наблюдений).

Важным результатом анализа данных каталога является оценка степени соответствия ISO SWS спектра SED, полученной по данным фотометрии из разных источников. Оказалось, что в достаточно популярном атласе Слоуна и др. [10] (более 200 цитирований на конец 2023 г.) лишь у 60% объектов ISO SWS спектры соответствуют SED и могут быть использованы в том виде, в котором они приводятся в Атласе. Такие объекты помечены знаком «+» в нашем каталоге. Для  $\approx 20\%$  объектов требуется полная перекалибровка сырых спектров с сайта ISO (знак «-» в каталоге). Спектры еще 20% звезд можно использовать частично, в той области спектра (обычно — в длинноволновой), где они соответствуют SED (знак «+» в каталоге).

Для ярких объектов каталога надо с вниманием относиться к данным фотометрии WISE в полосах W1 и W2. При потоках  $> 5 \cdot 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>мкм возможен пересвет детектора. Косвенным признаком пересвета являются значительные (десятичные доли величины) ошибки фотометрии в этих полосах.

Светимости всех объектов в каталоге получены из болометрического потока  $F_{\text{bol}}$ , измеренного по сглаженному и исправленному за межзвездное поглощение SED, и расстояния  $L = 4\pi D^2 F_{\text{bol}}$ . Таким образом, светимость в значительной степени зависит от принятого расстояния до объекта, особенно для объектов, расположенных в областях с высоким межзвездным поглощением. Несмотря на использование наиболее современных значений расстояний из каталога Gaia EDR3 [28], по-видимому, для красных переменных звезд большого радиуса, обладающих

протяженными холодными атмосферами и часто околозвездными пылевыми оболочками, ошибки определения расстояний остаются большими.

Нами отобрано 27 углеродных звезд для исследования их околозвездных пылевых оболочек с помощью программы решения уравнений переноса излучения в пылевой среде RADMC-3D. Для дополнения SED в области длин волн 2–5 мкм (в том числе для замены наблюдений WISE ярких источников) начаты наблюдения этих объектов с новой ИК-камерой LMP 2.5-м телескопа КГО. Полученные данные демонстрируют высокую точность фотометрии.

Работа выполнялась с использованием оборудования, приобретенного по Программе развития Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (научно-образовательная школа «Фундаментальные и прикладные исследования космоса»). Работа А. Татарникова (постановка задачи, анализ данных) поддержана РНФ (грант № 23-22-00182). С. Желтоухов (наблюдения с фотометром LMP, калибровка и обработка полученных данных) благодарит за поддержку Фонд развития теоретической физики и математики «БАЗИС» №21-2-10-35-1. Работа выполнена на основе наблюдений ISO, проекта ЕКА, финансируемого государствами-членами ЕКА (особенно странами-участницами — Францией, Германией, Нидерландами и Великобританией) при участии ISAS и NASA. В этой публикации использованы данные, полученные с помощью спутника WISE, который является совместным проектом Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе и Лаборатории реактивного движения/Калифорнийского технологического института, финансируемым NASA.

- 
- [1] *Iben I. and Renzini A.* // *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **21**, 271 (1983).
- [2] *Höfner S., Olofsson H.* // *Astron. & Astrophys. Rev.* **26**, 1 (2018).
- [3] *Treffers R. and Cohen M.* // *Astrophys. J.* **188**, 545 (1974).
- [4] *Kessler M.F., Steinz J.A., Anderegg M.E. et al.* // *Astron. & Astrophys.* **315**, L27 (1996).
- [5] *de Graauw T., Haser L.N., Beintema D.A. et al.* // *Astron. & Astrophys.* **315**, L49 (1996).
- [6] *Желтоухов С.Г., Татарников А. М.* // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* №6, 57 (2022). (*Zheltoukhov S.G., Tatarnikov A.M.* // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **77**, 886 (2022)).
- [7] *Желтоухов С.Г., Татарников А.М., Белякова А.А., Кокшарова Е.А.* // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* **79**, 2410801 (2024). (*Zheltoukhov S.G., Tatarnikov A.M., Belyakova A.A., Koksharova E.A.* // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **79**, 97 (2024)).
- [8] *Shatsky N., Belinski A., Dodin A. et al.* // *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century: Proc. All-Russian Conf.* Ed. by D.O. Kudryavtsev, A.F. Valeev, I.I. Romanyuk, and I.A. Yakunin (Spetsial'naya Astrofizicheskaya Observatoriya RAN, Nizhny Arkhyz, Karachay-Cherkessia, 2020), pp. 127–132.
- [9] *Шенаврин В.И., Таранова О.Г., Наджип А.Э.* // *Астрономический журнал.* **88**, 34. (2011). (*Shenavrin V.I., Taranova O.G., Nadzhip A.E.* // *Astron. Rep.* **55**, 31 (2011)).
- [10] *Sloan G.C., Kraemer K.E., Price S.D., Shipman R.F.* // *Astrophys. J. Suppl.* **147**, 379 (2003).
- [11] *Федотьева А.А., Татарников А.М., Сафонов Б.С. и др.* // *Письма в Астрон. журнал.* **46**, 41 (2020). (*Fedoteva A.A., Tatarnikov A.M., Safonov B.S. et al.* // *Astron. Lett.* **46**, 38 (2020)).
- [12] *Татарников А. М., Желтоухов С. Г., Шенаврин В. И. и др.* // *Письма в Астрон. журнал.* **50**, (в печати) (2024). (*Zheltoukhov S.G., Tatarnikov A.M., Shenavrin V.I. et al.* // *Astron. Lett.* **50** (2024). (in

- press)).
- [13] *Davies C.L.* // *SoftwareX*. **14**, 100687 (2021).
- [14] *Skrutskie M.F., Cutri R.M., Stiening R.* et al. // *Astron. J.* **131**, 1163 (2006).
- [15] *Ishihara D., Onaka T., Kataza H.* et al. // *Astron. & Astrophys.* **514**, A1 (2010).
- [16] *Bianchi L., Herald J., Efremova B.* et al. // *Astrophys. Space Sci.* **335**, 161–9 (2011).
- [17] *Brown A.G.A., Vallenari A.* Gaia Collaboration et al. // *Astron. & Astrophys.* **616**, A1 (2018).
- [18] *Høg E., Fabricius C., Makarov V. V.* et al. // *Astron. & Astrophys.* **355**, L27–30 (2000).
- [19] *Neugebauer G., Habing H.J., van Duinen R.* et al. // *Astrophys. J.* **278**, L1 (1984).
- [20] *Di Francesco J., Johnstone D., Kirk H.* et al. // *Astrophys. J. Suppl.* **175**, 277–9 (2008).
- [21] *Henden A.A., Levine S., Terrell D., Welch D.L.* // *Amer. Astr. Soc. Meet.* **225**, 336.16 (2015).
- [22] *Egan M.P., Price S.D., Kraemer K.E.* et al. *VizieR Online Data Catalog*. V/114 (2003).
- [23] *Abazajian K.N., Adelman-McCarthy J.K., Agüeros M.A.* et al. // *Astrophys. J. Suppl.* **182**, 543–58 (2009).
- [24] *Werner M., Roellig T., Low F.* et al. // *Astrophys. J. Suppl.* **154**, 1 (2004).
- [25] *Wright E.L., Eisenhardt P.R.M., Mainzer A.K.* et al. // *Astron. J.* **140**, 1868 (2010).
- [26] *Page M. J., Brindle C., Talavera A.* et al. // *MNRAS*. **426**, 903 (2012).
- [27] *Архипова В.П., Иконникова Н.П., Носкова Р.И.* // Письма в Астрон. журн. **19**, 437 (1993). (*Arkhipova V.P., Ikonnikova N.P., Noskova R.I., Komissarova G.V.* // *Astron. Lett.* **28**, 257 (1993)).
- [28] *Brown A.G.A., Vallenari A.* et al. Gaia Collaboration // *Astron. & Astrophys.* **649**, A1 (2021).
- [29] *Green G.M., Schlafly E., Zucker C.* et al. // *ApJ*. **887**, 93. (2019).
- [30] *Cardelli J.A., Clayton G.C. and Mathis J.S.* // *Astrophys. J.* **345**, 245 (1989).
- [31] *Самусь Н.Н., Казаровец Е.В., Дурлевич О.В.* и др. // Астрон. журн. **94**, 87 (2017). (*Samus' N.N., Kazarovets E.V., Durlevich O.V.* et al. // *Astron. Rep.* **61**, 80 (2017)).
- [32] *Koornneef J.* // *Astron. & Astrophys.* **128**, 84 (1983).
- [33] *Aringer B., Girardi L., Nowotny W.* et al. // *Astron. & Astrophys.* **503**, 913 (2009).

## Spectral Energy Distribution of Late Stage Stars

A. M. Tatarnikov<sup>1,2,a</sup>, S. G. Zheltoukhov<sup>1,2</sup>, E. D. Malik<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

<sup>2</sup>*Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119234, Russia*

<sup>3</sup>*Institute of astronomy of Russian Academy of Sciences, Moscow 119017, Russia*

E-mail: <sup>a</sup>[andrew@sai.msu.ru](mailto:andrew@sai.msu.ru)

This paper presents a catalog of the energy distribution in the spectra of 263 stars in the wavelength range 0.4 - 100  $\mu\text{m}$ , which are at late stages of evolution and have been observed by the ISO space observatory. For each object in the catalog, estimates of the observed bolometric fluxes are derived from smoothed energy distribution curves. The catalog is available at [https://infra.sai.msu.ru/sai\\_iss\\_sed](https://infra.sai.msu.ru/sai_iss_sed) both as a table and in machine-readable format. It is shown that for the specified sample of objects their ISO SWS spectra in the range 2.4 - 45  $\mu\text{m}$  only in 60% of cases correspond to the general shape of the continuum, and can be used without recalibration. A selection of carbon stars accessible to infrared observations from the MSU observatories was made. For some of them, the first brightness estimates in the *K*, *L*, and *M* bands were obtained with the new IR camera of the 2.5-m telescope of CMO.

PACS: 97.10.Fy, 97.10.Ri.

*Keywords:* AGB and post-AGB stars, dust envelopes, catalogs.

*Received* 04 February 2024.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2024. **79**, No. 3. Pp. .

### Сведения об авторах

1. Татарников Андрей Михайлович — канд. физ.-мат. наук, доцент, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-16-61, e-mail: [andrew@sai.msu.ru](mailto:andrew@sai.msu.ru).
2. Желтоухов Сергей Геннадьевич — аспирант физического факультета МГУ, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-16-61.
3. Малик Екатерина Денисовна — студентка 4 курса, инженер отдела Физики звездных систем ИНАСАН; тел.: (495) 939-16-61,.